

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 20 декабря 2018 года публичной защиты диссертации Овчинникова Вячеслава Александровича «Математическое моделирование аэродинамических процессов и тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

На заседании присутствовали 18 из 26 членов диссертационного совета, из них 6 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы:

- |   |                      |          |
|---|----------------------|----------|
| 1. Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 2. Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета | д-р техн. наук       | 01.02.04 |
| 3. Пикушак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета   | канд. физ.-мат. наук | 01.02.05 |
| 4. Архипов Владимир Афанасьевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 5. Биматов Владимир Исмагилович   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 6. Бутов Владимир Григорьевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 7. Ворожцов Александр Борисович   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 8. Глазунов Анатолий Алексеевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 9. Глазырин Виктор Парфирьевич  | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 10. Зелепугин Сергей Алексеевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 11. Крайнов Алексей Юрьевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 12. Кульков Сергей Николаевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 13. Люкшин Борис Александрович  | д-р техн. наук       | 01.02.04 |
| 14. Прокофьев Вадим Геннадьевич   | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |
| 15. Скрипняк Владимир Альбертович   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 16. Тимченко Сергей Викторович  | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.05 |
| 17. Черепанов Олег Иванович   | д-р физ.-мат. наук   | 01.02.04 |
| 18. Шрагер Эрнст Рафаилович   | д-р физ.-мат. наук   | 01.04.14 |

**В связи с кончиной председателя диссертационного совета доктора физико-математических наук, профессора Гришина Анатолия Михайловича заседание провел заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить В. А. Овчинникову ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,  
созданного на базе федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 20.12.2018 № 358**

О присуждении **Овчинникову Вячеславу Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Математическое моделирование аэродинамических процессов и тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов»** по специальности **01.02.05** – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 16.10.2018 (протокол заседания № 349) диссертационным советом Д 212.267.13, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Овчинников Вячеслав Александрович**, 1978 года рождения.

В 2000 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

В 2003 году соискатель очно окончил аспирантуру государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

Для подготовки диссертации на соискание ученой степени кандидата наук с 01.11.2015 прикреплен к федеральному государственному автономному образовательному учреждению высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности инженера в учебной лаборатории кафедры физической и вычислительной механики в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный

исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физической и вычислительной механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор технических наук, **Якимов Анатолий Степанович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра физической и вычислительной механики, профессор.

Официальные оппоненты:

**Зудов Владимир Николаевич**, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики быстропротекающих процессов, ведущий научный сотрудник

**Костин Геннадий Федотович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Южно-Уральский научный центр», отдел фундаментальных проблем аэрокосмических технологий, старший научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)**», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном **Резником Сергеем Васильевичем** (доктор технических наук, профессор, кафедра ракетно-космических композитных конструкций, заведующий кафедрой) и **Просунцовым Павлом Викторовичем** (доктор технических наук, доцент, кафедра ракетно-космических композитных конструкций, профессор), указала, что, несмотря на многолетнюю историю преодоления «теплового барьера», многие важные вопросы тепловой защиты летательных аппаратов все еще

недостаточно разработаны, в том числе вопрос об учете влияния вращения осесимметричных тел, типа полусферически затупленного конуса, совершающего полет с гиперзвуковой скоростью под углом атаки на характер протекающих тепломассообменных процессов на поверхности и в объеме теплозащитных покрытий. Данная проблематика находится в русле приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации (24. Технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения), следовательно, тема диссертационной работы является актуальной. В. А. Овчинниковым решена задача аэродинамического нагрева сферически затупленного конуса при гиперзвуковом пространственном обтекании потоком химически равновесного воздуха с учетом термохимического разрушения теплозащитного покрытия при скоростях вращения тела от 0 до 500 градус/с; установлено, что величина тепловой асимметрии на поверхности затупленного конуса зависит от его скорости вращения нелинейно и немонотонно; получено, что максимум величины тепловой асимметрии для графита В-1 достигается при меньшей скорости вращения (25 градус/с), чем для углепластика; показано, что при параметре вращения  $\Omega = 7,9 \cdot 10^{-6}$  асимметрия температуры и скорости массового уноса с поверхности влияет на боковую силу, моменты крена и рыскания существенно сильнее, чем асимметрия течения в пограничном слое. Выявленные закономерности и разработанные инструментальные средства исследований могут быть использованы в ряде НИР и ОКР предприятий подведомственных ГК Роскосмос, Ростехнология и др.

Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликована 31 работа, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 8 работ (из них в зарубежном научном журнале, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа; в российских научных журналах, переводные версии которых входят в Web of Science, опубликовано 5 работ); в научных изданиях, входящих в Web of Science и Scopus, опубликовано 4 работы; в научных журналах опубликовано 3 работы, в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций и форума опубликовано 14 работ; свидетельств о государственной регистрации электронных программ для ЭВМ получено 2. Общий объем публикаций автора – 15,37 а.л., личный вклад автора – 6,31 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Зинченко В. И. Аэродинамика и сопряженный тепломассобмен затупленных тел при сверхзвуковом обтекании с учетом осложняющих факторов / В. И. Зинченко, В. Д. Гольдин, К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников**, А. С. Якимов // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – № 4 (5). – С. 2178–2180. – 0,35 / 0,07 а.л.

2. Ефимов К. Н. Математическое моделирование влияния вращения на характеристики сопряженного тепломассообмена при высокоэнтальпийном обтекании затупленного по сфере конуса под углом атаки / К. Н. Ефимов, **В. А. Овчинников**, А. С. Якимов // Теплофизика и аэромеханика. – 2017. – Т. 24, № 5. – С. 677–689. – 1,52 / 0,51 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

Efimov K. N. Mathematical modeling of rotation effects on conjugate heat and mass transfer at a high-enthalpy flow around a spherically blunted cone at incidence / K. N. Efimov, **V. A. Ovchinnikov**, A. S. Yakimov // Thermophysics and Aeromechanics. – 2017. – Vol. 24, № 5. – P. 657–669. – DOI: 10.1134/S086986431705002X.

3. Efimov K. N. Rotation Influence on Heat Transfer at Supersonic Flow Around a Blunted Body [Electronic resource] / K. N. Efimov, **V. A. Ovchinnikov**, A. S. Yakimov // AIAA Journal. – 2018. – Vol. 56, № 2. – P. 743–751. – URL: <https://arc.aiaa.org/doi/full/10.2514/1.J056282> (access date: 11.01.2018). – DOI: 10.2514/1.J056282 (Published online: 27 October 2017). – 0,95 / 0,32 а.л. (*Web of Science*).

4. **Овчинников В. А.** Математическое моделирование процесса теплообмена в теплозащитном материале / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – Т. 57, № 6. – С. 150–159. – 1,17 / 0,58 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

**Ovchinnikov V. A.** Mathematical modeling of heat transfer in a heat-shielding material / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2016. – Vol. 57, № 6. – P. 1093–1100. – DOI: 10.1134/S0021894416060171.

**5. Овчинников В. А.** Математическое моделирование влияния шероховатости поверхности и массового уноса на тепловую защиту / В. А. Овчинников, А. С. Якимов // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55, № 5. – С. 782–787. – 0,7 / 0,35 а.л.

*в переводной версии журнала, индексируемой Web of Science:*

**Ovchinnikov V. A.** Mathematical simulation of the influence of surface roughness and mass loss on thermal protection / V. A. Ovchinnikov, A. S. Yakimov // High Temperature. – 2017. – Vol. 55, № 5. – P. 782–787. – DOI: 10.1134/S0018151X17040162.

На автореферат поступило 9 положительных отзывов. Отзывы представили:

- Н. В. Павлюкевич**, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории теории переноса Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, *с замечанием*: при исследовании гиперзвуковых потоков следовало бы учитывать неравновесность газа по колебательным степеням свободы.
- С. Ф. Молчанов**, заместитель генерального конструктора по проектированию изделий и комплексов, первый заместитель начальника КБ-1 АО «ГРЦ Макеева» и **Ю. А. Мокин**, д-р физ.-мат. наук, доц., главный научный сотрудник АО «ГРЦ Макеева», г. Миасс, *с замечаниями*: в работе рассмотрены ЛА только с геометрией затупленного по сфере конуса, из содержания автореферата неясно, насколько это ограничение сказывается на общности и области применимости полученных в работе результатов; в Главе 4 (стр. 20, автореф.) утверждается, что для каждого теплозащитного материала существует значение скорости вращения, при котором величина тепловой асимметрии достигает максимального значения, однако в рассмотренном диапазоне скоростей вращения при  $\omega < 500$  град/с для Углепластика (на рисунке 10) такого максимума не наблюдается; в автореферате отражена констатируется полученное существенное качественное и

количественное различие рассматриваемых параметров асимметрии процесса для Графита В-1 и Углепластика, но не указаны причины, свойства, характеристики указанных теплозащитных покрытий, обуславливающие эти различия.

3. **А. Н. Субботин**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор научно-образовательно центра И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: в формуле (8) на стр. 9 приводится, что  $\eta = \varphi$ , хотя  $\varphi$  нигде до этого не определялось; нет пояснения, с какой целью на стр. 12 автор ищет решение для компонент вектора скорости в виде:  $u = u_e U_0 - \omega R_N \sin \beta \sin \varphi U_1$  и аналогично для  $w$ ; величины  $s$  и  $\bar{s} = s / R_N$  слабо отличаются друг от друга, верхняя черта почти полностью сливается с буквой  $s$ , причем  $\bar{s}$  в дальнейшем используется лишь один раз; неясно, почему используется алгебраическая модель турбулентности, а не широко распространенные в настоящее время в аэродинамике модели турбулентности, например, Спаларта-Альмараса (Spalart-Allmaras).

4. **В. В. Бухмиров**, д-р техн. наук, профессор кафедры «Теоретические основы теплотехники» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И. Ленина», *с замечаниями*: на защите следует пояснить, какие новые элементы при построении математических моделей исследуемых процессов аэродинамики и теплообмена предложил соискатель лично; неясно, как были определены значения коэффициентов теплообмена и массообмена; в формуле (22) на стр. 15 автореферата, очевидно, допущена опечатка при обозначении коэффициента теплообмена (теплоотдачи); по тексту автореферата не все величины в формулах обозначены; в автореферате отсутствует четкая информация о проверке достоверности разработанных математических моделей и алгоритмов; не указано, какую среду программирования использовал диссертант и какие вычислительные ресурсы необходимы для реализации разработанного автором комплекса программ.

5. **В. В. Белов**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией распространения оптических сигналов Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, *с замечаниями*: отсутствуют конкретные данные по вкладу малых энергетических возмущений в интенсивность процесса теплообмена (параграф 3.2) и по влиянию пористости и теплофизических свойств проницаемых металлов при наличии вдува

газа-охлаждителя на теплообмен (параграф 3.3); описание к последней формуле на стр. 11 приведено выше самой формулы; имеется путаница в обозначениях.

6. **Б. В. Бошнятов**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории физико-химической механики перспективных технологий Института прикладной механики РАН, г. Москва, *с замечаниями*: в автореферате доказательств утверждениям автора о проведено тестирования математической модели и разработанного программного обеспечения путем сравнения с экспериментальными и не расчетными данными и количественном согласовании конкретных результатов численных расчетов с экспериментальными данными; на всех 10 рисунках, иллюстрирующих численные результаты автора отсутствуют сравнения с экспериментами или расчетами других авторов; в автореферате отсутствуют сведения о том, как определялись линии перехода ламинарного пограничного слоя в переходный и турбулентное состояние.

7. **А. В. Колычев**, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры А1 Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, *с замечаниями*: утверждение автора, что «... можно пренебречь влиянием вращательного движения на нормальный градиент давления и невязкое течение около тела...» требует более тщательного обоснования; выводы заключения по п. 7 (стр. 21) носят достаточно общий характер; в автореферате отсутствуют сведения о точности полученных автором результатов; неясно, проводились ли автором сравнения разработанного комплекса программ сопряженного тепломассообмена для случая гиперзвукового пространственного обтекания вращающегося затупленного тела с известными пакетами по времени и точности расчета; неясно, использовалась ли в комплексе программ технология параллельных вычислений для ускорения расчетов при решении трехмерных сопряженных задач тепломассообмена.

8. **В. И. Ряжских**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной математики и механики Воронежского государственного технического университета, *с замечанием* об отсутствии в автореферате какого-либо сравнительного анализа с экспериментальными данными для подтверждения корректности развиваемого подхода.

9. **А. А. Цынаева**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» Самарского государственного технического университета, *с замечаниями*: в автореферате

используются сокращения, не описанные автором (аббревиатура ТЗП встречается в 7 строчке на стр. 4 автореферата, ее расшифровка приведена на последней строчке стр. 4 автореферата); вызывает вопросы отсутствие в работе сравнения результатов численных исследований автора с результатами численных исследований, проведенных с помощью коммерческого (Ansys, Catia и т.д.) или свободного (OpenFoam и др.) программного обеспечения, или облачных сервисов (Simscale); наличие такого сравнения сняло бы вопрос о необходимости разработки автором своих программных средств для решения задач тепловой защиты гиперзвуковых летательных аппаратов; из автореферата неясно, для каких сеток (по количеству ячеек) проводился анализ сеточной сходимости, не приведены результаты такого анализа (ни в графическом, ни в числовом эквиваленте); из автореферата неясно, на основании чего сделан вывод об адекватности разработанных программных средств, так как в автореферате не представлены результаты графического сравнения результатов численного исследования с экспериментами [G. F. Widhopf, 1971; R. Hall, 1972; R. Feldhuhn, 1976] для задачи пространственного и осесимметричного обтекания сферически затупленных конусов, не приведена оценка коэффициента детерминации или критерия Фишера, либо каких-либо других параметров.

В отзывах отмечается, что актуальность диссертационного исследования В. А. Овчинникова, посвященного проблемам динамики вращающихся скоростных летательных аппаратов, определяется тем, что развитие ударных ракетных комплексов с поражающими элементами на гиперзвуковых скоростях является приоритетом оборонно-промышленного комплекса страны. Определение влияния вращения тела относительно продольной оси во взаимодействии с другими протекающими процессами тепломассообмена на аэродинамические силы и моменты является важнейшей практической задачей. В. А. Овчинниковым разработаны новые математическая модель и методика расчета, позволившие провести анализ влияния углового движения тела на характеристики нестационарного тепломассообмена в рамках сопряженной постановки с учетом различных режимов течения в пограничном слое, термохимического разрушения теплозащитного покрытия при гиперзвуковом обтекании под углами атаки; впервые исследована роль

одновременного вращения тела вокруг продольной оси, термического разложения углепластика, вдува газа-охладителя через проницаемую поверхность. Полученные в диссертации и представленные в автореферате результаты расширяют и дополняют теоретические представления об аэродинамических и тепломассообменных процессах, протекающих при пространственном сверхзвуковом обтекании вращающегося летательных аппаратов в условиях термохимического разрушения тепловой защиты. Разработанный автором диссертации комплекс программ, позволяющий определять тепловые и аэродинамические характеристики обтекаемого тела в широком диапазоне определяющих параметров, может быть использован при проектировании, создании и оценках эффективности различных способов тепловой защиты перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В. Н. Зудов** – известный специалист в области численного моделирования сверхзвуковых и вихревых течений с ударными волнами; аэрогазодинамики элементов летательных аппаратов; импульсно-периодического энергетического воздействия; **Г. Ф. Костин** – известный специалист в области математического моделирования процессов аэротермогазодинамики, тепловой защиты, прочности, динамики движения и параметров конструкций высокоскоростных летательных аппаратов; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)** известен своими исследованиями и разработкой космической техники, на базе которого в том числе активно развиваются направления, связанные с теорией теплообмена, физической аэрогазодинамикой, тепломассопереносом, современными композиционными материалами, моделированием тепловой защиты.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*разработана* математическая модель, методика расчета и программное обеспечение для описания нестационарного сопряженного тепломассообмена при гиперзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного конуса потоком вязкого сжимаемого газа с учетом термохимического разрушения

теплозащитного покрытия и вращательного движения вокруг продольной оси тела;

*показано*, что при сверхзвуковом обтекании ( $M_\infty = 5$ ) вращающегося сферически затупленного конуса под углом атаки  $10^\circ$  и термическом разложении углепластика при параметре вращения  $\Omega = 7,9 \cdot 10^{-6}$  величины боковой силы, моментов крена и рыскания, возникающих из-за асимметрии температуры и скорости массового уноса продуктов пиролиза с поверхности, выше на 2-3 порядка, чем величины этих сил и моментов, обусловленных асимметрией течения в пограничном слое;

*установлено*, что теплозащитный материал на основе углепластика с долей смолы 34,76% имеет наименьшую скорость массового уноса продуктов пиролиза в течение 7,5 и 50 с аэродинамического нагрева, действующего на сферически затупленное тело при полете со сверхзвуковой скоростью ( $M_\infty = 5$ ) на высотах 20 и 40 км соответственно; максимальная разница температур поверхности по сравнению с аналогичными инертными теплозащитными материалами зависит от состава углепластика и при полете на высоте 40 км находится в диапазоне от 12,5 до 22,6 К;

*показано*, что при вращении сферически затупленного конуса с угловой скоростью 50 градус/с, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа ( $M_\infty = 23,3$ ) под углом атаки  $5^\circ$ , перепад температур на графите В-1 уменьшается с 1004,4 К до 327 К, на углепластике – с 688 К до 526,9 К; в диапазоне скоростей вращения от 0 до 500 градус/с фазовый сдвиг между давлением и температурой поверхности тела монотонно зависит от  $\omega$  и для графита В-1 он больше, чем для углепластика максимум на  $15^\circ$ ; фазовый сдвиг между давлением и скоростью уноса массы на аблирующей поверхности теплозащитного углеродного материала равняется  $0^\circ$  для данных условий;

*получено*, что при вращении сферически затупленного конуса, обтекаемого гиперзвуковым потоком газа ( $M_\infty = 23,3$ ) под углом атаки  $5^\circ$ , максимум величины тепловой асимметрии для графита В-1 достигается при меньшей скорости вращения (25 градус/с), чем для углепластика; величина тепловой асимметрии при скоростях вращения до 100 градусов для графита больше, чем для углепластика.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

*полученные* результаты расширяют теоретические представления об аэродинамических и тепломассообменных процессах, протекающих при

пространственном сверхзвуковом обтекании вращающегося летательного аппарата в условиях термохимического разрушения теплозащитного покрытия.

**Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:**

*разработаны* программный комплекс и методики исследования, позволяющие определять тепловые и аэродинамические характеристики обтекаемого тела в широком диапазоне определяющих параметров, который может быть использован при проектировании, создании и оценке эффективности различных способов тепловой защиты перспективных гиперзвуковых летательных аппаратов.

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Разработанные методики исследований характеристик сопряженного теплообмена могут быть использованы в инженерных расчетах сверхзвукового обтекания летательного аппарата и найти применение при проектировании и разработке новых систем тепловой защиты летательного аппарата, проводимых в различных научных и учебных заведениях: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва), Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева (г. Миасс), Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, а также в других организациях, занимающихся исследованиями изделий ракетно-космической техники, и использоваться при подготовке высококвалифицированных специалистов в области механики жидкости, газа и плазмы.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Обоснованность научных положений и выводов, сделанных в диссертационной работе, следуют из адекватности используемых физических и математических моделей;

*подтверждается* согласованием численных расчетов с известными экспериментальными данными и осуществлением проверки решения задачи сеточной сходимостью.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в том, что *разработана* математическая модель и методика расчета, с помощью которых впервые решена задача и численно проанализировано влияние вращательного движения тела на характеристики нестационарного теплообмена в рамках сопряженной постановки с учетом ламинарного, переходного, турбулентного режимов течения в пограничном слое, термохимического разрушения теплозащитного покрытия при гиперзвуковом обтекании тела под ненулевым углом атаки;

впервые численно *определены* аэродинамические силы и моменты, возникающие вследствие одновременного воздействия вращения тела вокруг продольной оси, аэродинамического нагрева, термического разложения углепластика, с силами и моментами, обусловленными асимметрией течения около изотермической поверхности в пограничном слое при сверхзвуковом пространственном обтекании сферически затупленного конуса;

*проведены* численные исследования процессов теплообмена теплозащитных материалов на основе углепластика с различной массовой долей фенолформальдегидного связующего в условиях аэродинамического нагрева при сверхзвуковом пространственном обтекании и термическом разложении;

впервые численно *исследовано* влияние скорости осевого вращения на фазовый сдвиг между давлением и температурой поверхности теплозащитного углеродного материала при термохимическом разрушении и движении сферически затупленного конуса с гиперзвуковой скоростью;

впервые *определены* характеристики асимметрии теплового поля и скорости массового уноса на аблирующей поверхности теплозащитного углеродного материала, возникающей в условиях вращения и гиперзвукового обтекания сферически затупленного конуса под углом атаки.

